

напряжения $3 \cdot 10^4$ В за время 1 с) возможно получить при значении сопротивления жил соединительного кабеля до 150 Ом (например, используя геофизический кабель КГЗ-110-180 длиной $5 \cdot 10^3$ м с сопротивлением жилы 12 Ом/км).

Полученные результаты имеют большое значение при построении систем электропитания не только погружных комплексов интенсификации добычи воды и нефти, но и устройств, используемых в геологической и геофизической практике.

Список литературы: 1. I.S.Shvets, Yu.I.Kurashko, N.N.Klimanskiy, O.V.Khvyoshchan, L.I. Onishchenko Electrohydroimpulse Equipment for Increase of the Output of Oil and Intake Wells // 13th International Symposium on High Current Electronics: Proceedings. Tomsk: Publishing house of the IAO SB RAS, 2004. – PP. 409-411. 2. Ю.И.Курашко, О.В.Хвоцан, И.С.Швец Повышение эффективности преобразования энергии в зарядной цепи электроразрядных установок, предназначенных для увеличения притока нефти в скважины // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск: «Електроенергетика і перетворююча техніка». – Харків: НТУ «ХП». – 2004. – № 35, т.1. – С. 123-130. 3. Геофизические методы исследования скважин. Справочник / Под ред. В.М.Запорожца. – М.: Недра, 1983. – 591 с.

Поступила в редколлегию 21.11.2006

УДК 681.51: 537.528

С.С.КОЗЫРЕВ, Институт импульсных процессов и технологий
НАН Украины; Национальный университет кораблестроения, Николаев

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ УСТАНОВКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Проведено дослідження електроімпульсної установки як об'єкта керування, розроблено адаптивну систему керування на основі використання апарату нечіткої логіки, що забезпечує необхідні режими роботи при змінних технологічних параметрах та зовнішніх впливах.

The research of electropulse installation as an object of control was done. The adaptive system of control was developed based on fuzzy logic. The proposed solution provides required operating mode under dynamic external conditions and technological parameters.

Введение. Электроимпульсные установки (ЭИУ) широко применяются в разрядноимпульсных технологиях для электроимпульсной очистки отливок, снятия остаточных напряжений, разрушения негабаритов, штамповки, интенсификации процессов кристаллизации и др. Источником воздействия в них является импульс давления, генерируемый каналом высоковольтного элект-

трического разряда в жидкости, который возникает между электродами или электродом и изделием. Процессы в канале разряда имеют стохастический характер, обусловленный значительной степенью неопределенности процессов, протекающих на стадии формирования канала сквозной проводимости, и требуют определения и учета статистических характеристик, зависящих от параметров разрядного контура и внешней среды. Электроимпульсный процесс преобразования энергии как объект управления можно считать стохастической системой с выходными координатами, являющимися случайными функциями нестационарными по математическому ожиданию.

Существующие системы управления [1] обеспечивают поддержание оптимальных режимов обработки при заданных неизменных параметрах разрядного контура и внешней среды, что снижает точность и сужает зону управляемости объекта. Отсутствие систем управления, обеспечивающих необходимые режимы обработки при изменяющихся технологических параметрах и внешних условиях, сдерживает дальнейшее расширение области применения энергоэффективных разрядноимпульсных технологий.

Целью работы является разработка на основе использования нечеткой логики адаптивной системы управления электроимпульсной установкой, обеспечивающей необходимые режимы обработки при различных характеристиках разрядного контура установки и обрабатываемых объектов, изменяющихся технологических параметрах и внешних условиях.

Решение поставленной задачи потребовало аналитического исследования существующих моделей электроимпульсного преобразования энергии; экспериментального исследования информационных координат вектора состояния объекта управления, статистические характеристики которых изменяются в процессе функционирования электроимпульсной установки.

В качестве координат вектора состояния объекта на стадии преобразования энергии посредством высоковольтного разряда в жидкости (ВРЖ) приняты следующие величины: емкость разрядного конденсатора C , индуктивность разрядного контура L , напряжение на разрядном промежутке в момент его замыкания $U_{\text{пр}}[n]$, длина разрядного промежутка l , удельное сопротивление воды ρ , максимальное значение тока в разрядном контуре $i_m[n]$. При постоянстве значений C , L , определяемых конструкцией установки, однозначно процесс могут характеризовать переменные $i_m[n]$, $U_{\text{пр}}[n]$, а также их линейные комбинации. Эти координаты являются наблюдаемыми, операционно определенными, но имеют статистический разброс, вызванный процессами формирования разряда. В качестве канала регулирующего воздействия может быть принята длина межэлектродного промежутка l . Существует способ ее оперативного изменения с помощью исполнительного механизма.

Для эффективного исследования информационных координат и их ста-

тистических характеристик на всей области определения проведен дробный факторный эксперимент, в котором проводилось одновременное варьирование независимых переменных на всех выбранных уровнях. Эксперименты проводились при одном значении факторов C , L и комбинировании факторов ρ , l , и их уровней. Матрица факторного эксперимента, построенная по методике [2], приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Матрица факторного эксперимента

$l, \text{ м}$	$\rho, \text{ Ом м}$					
	6,0	7,5	10,0	15,0	20,0	25,0
0,025	+	+	+	+	+	+
0,050	+	+	+	+	+	+
0,075	+	+	+	+	+	+
0,100	+	+	+	+	+	+

Так как процесс носит вероятностный характер, то величина выборок составляла порядка 100-110 реализаций процесса в каждой точке, что обеспечило получение достоверных оценок с надежностью 0,95. Для каждой выборки определялись аналоги числовых характеристик случайных величин: математическое ожидание M , дисперсия D и среднеквадратичное отклонения σ . Результаты обработки экспериментальных данных статистическими методами с использованием регрессионного анализа показаны на графиках зависимостей $M_i = M(i_m[n]) = f(l)$ (рис. 1), $M_{U/i} = M(U_{np}[n]/i_m[n]) = f(l)$ (рис. 2), линии 1,2,3,4,5 соответствуют значениям ρ (Ом · м) 6,0; 7,5; 10,0; 15,0; 20,0. За базовые величины приняты амплитудное значение разрядного тока при коротком замыкании $I_{кз}$, начальное значение напряжения на разрядном промежутке U_c .

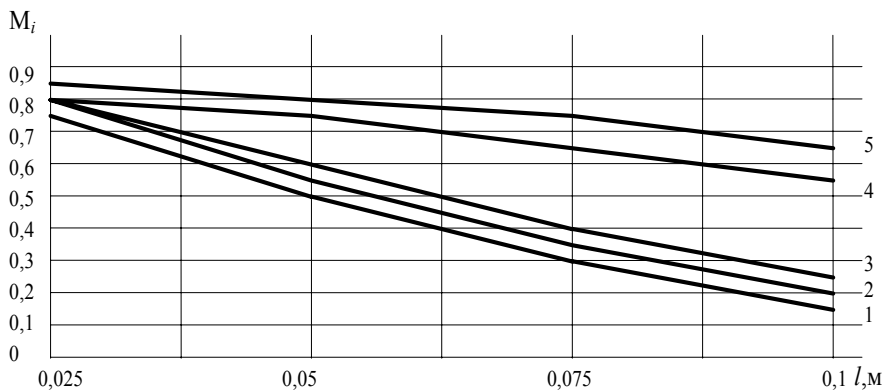


Рисунок 1 – Зависимость M_i от l при разных значениях ρ

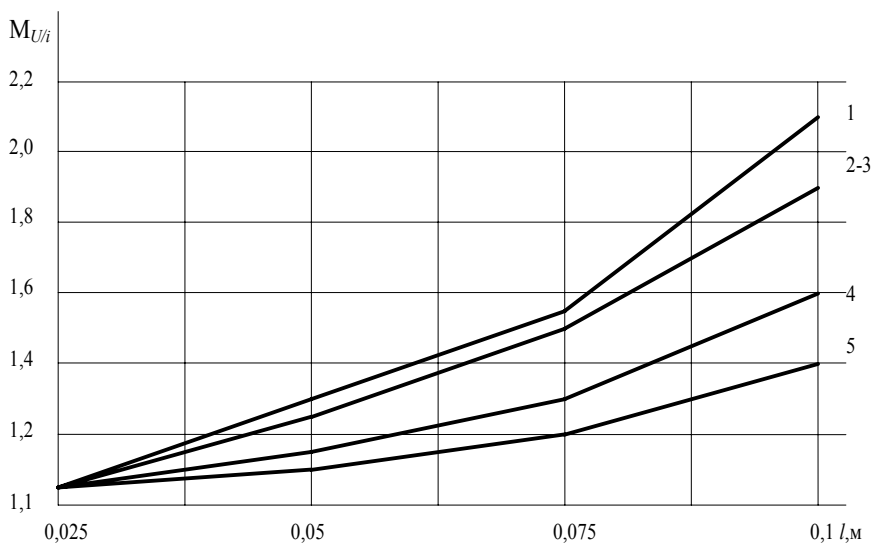


Рисунок 2 – Зависимость $M_{U/i}$ от l при различных значениях ρ

Была выдвинута гипотеза о том, что значения информационных координат $i_m[n]$, $U_{пр}[n]$ вектора состояния объекта распределены по нормальному закону в каждой точке факторного пространства. Согласно критерию согласия χ^2 [3] эта гипотеза не противоречит истине с уровнем значимости $\square = 0,01$ и может быть принята в качестве рабочей. Математическая обработка полученных результатов показала, что при фиксированных входных координатах процесс носит стационарный характер и к нему применима эргодическая гипотеза. Распределение реализаций по амплитудным значениям выходных информационных координат внутри каждой группы приближается к гауссовскому. Математическое ожидание амплитудного значения разрядного тока при неизменных входных координатах l и ρ остается постоянным и не зависит от n .

Из графиков (рис. 1) видно, что линии регрессии приближенно можно представить ломаными с прямолинейными участками:

$$M_i = a_0 + k_0(\rho, l)l. \quad (1)$$

Вычисленные для различных ρ коэффициенты a_0 и k_0 в рабочем диапазоне значений l приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения коэффициентов линии регрессии

ρ , Ом · м	6,0	7,5	10,0	15,0	20,0
a_0 , о.е.	0,75	0,78	0,79	0,83	0,87
k_0 , о.е.	-8	-8	-7,6	-3,4	-3

Поскольку в качестве информационных координат используются случайные величины, распределенные по нормальному закону $i_m[n]$, $U_{np}[n]$, то для уменьшения ошибки регулирования, вызванной их разбросом, может быть использовано суммирование коррелированных информационных сигналов с отрицательной корреляцией или в общем случае их комбинация. Был проведен корреляционный анализ [4], который показал, что, учитывая наличие корреляционной зависимости, с коэффициентом близким к «-1», между $U[n]/i_m[n]$ и $i_m[n]$, целесообразно использовать в качестве информационной координаты выходного вектора их линейную комбинацию следующего вида:

$$\Sigma = U_{np}[n]/i_m[n] + k i_m[n]. \quad (2)$$

Это существенно повышает точность оценки состояния объекта регулирования за счет снижения дисперсии информационной координаты и обеспечивает удовлетворительную точность регулирования режима при электроимпульсной обработке горизонтальных поверхностей с незначительными перепадами высоты и постоянным удельным сопротивлением жидкости. Но при обработке изделий со значительными перепадами высоты и изменяющимся удельным сопротивлением жидкости статистические характеристики информационных координат зависят от значения координат вектора состояния ρ , l (рис. 3, 4).

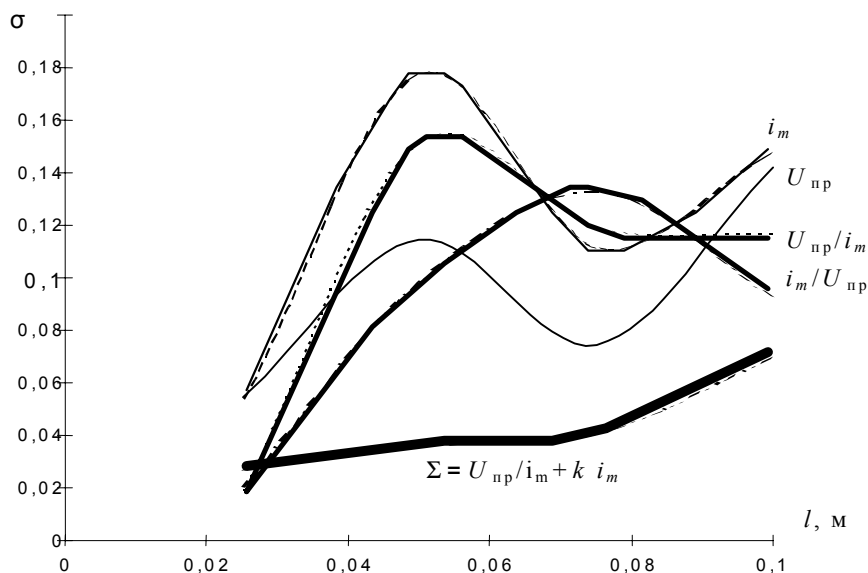


Рисунок 3 – Среднеквадратические отклонения при $\rho = 7,5$ Ом м

Результаты экспериментального исследования зависимости $\sigma = F(\rho) \Big|_{l=l_i}$ стандартного отклонения σ информационной координаты $\Sigma[n]$, приведенного

к математическому ожиданию, от удельного сопротивления жидкости ρ при различных постоянных значениях длины разрядного промежутка l представлены в табл. 3.

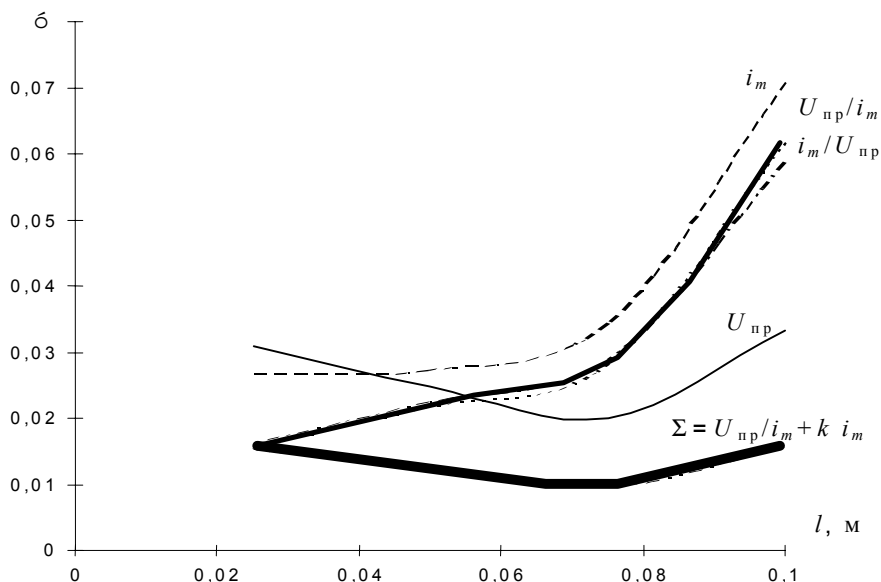


Рисунок 4 – Среднеквадратические отклонения при $\rho = 15 \text{ Ом м}$

Таблица 3

$\rho, \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $l, \text{ м}$	6,0	7,5	10,0	15,0	20,0
0,025	0,02768	0,02409	0,02294	0,01536	0,00974
0,050	0,03691	0,03613	0,03561	0,01426	0,01217
0,075	0,04253	0,04033	0,03874	0,01472	0,01267
0,100	0,07413	0,06950	0,04354	0,01664	0,01568

Анализ полученных результатов показывает, что коэффициенты регрессионной модели объекта управления и статистические характеристики информационных координат зависят от положения объекта в пространстве состояний и требуют корректировки в процессе управления, то есть адаптации.

Результаты проведенных исследований подтверждают, что объект управления относится к классу дискретно-непрерывных нормальных стохастических систем, что позволяет на основании принципа разделения задачу синтеза оптимального управления свести к двум независимым задачам: оптимальной статистической обработки информационного сигнала и синтеза ре-

гулятора при полной и точной информации. Для обработки стохастического информационного сигнала необходим синтез оптимального устройства оценки. Критерием оптимальности является точность оценки выходной координаты с учетом положения объекта управления в пространстве состояний. Оптимальное значение коэффициентов зависит от скорости изменения математического ожидания и дисперсии информационного сигнала. Это приводит к необходимости адаптации устройства оценки к изменяющимся условиям функционирования объекта управления. Задача синтеза регулятора решается на основании исследования функции потерь, которая с учетом особенностей преобразования энергии в электроимпульсных установках посредством подводного электровзрыва, имеет вид:

$$\Pi_{\text{и}} = \begin{cases} 0, \Pi \geq P_{\text{кр}} \\ W, \Pi < P_{\text{кр}} \end{cases} \quad \Pi(P, P_{\text{кр}}) = \sum_{i=1}^{N_0} W_i, \quad (3)$$

где W – энергия в импульсе, $P_{\text{кр}}$ – давление в волне сжатия, обеспечивающее технологический результат.

Исследование функции потерь позволило определить критерий оптимальности регулятора:

$$M(\Pi_0) = M(N_0/N) = \min, \quad (4)$$

где N_0 – количество импульсов с $P < P_{\text{кр}}$ ($l \neq l_{\text{опт}}$), N – общее количество импульсов.

Обеспечение в процессе регулирования полученного критерия оптимальности требует применения релейного закона управления, и поскольку информационная координата имеет статистический разброс, то в качестве регулятора используется релейное звено с зоной нечувствительности, представляющее собой типовую нелинейность с передаточной характеристикой $\Psi(\Sigma)$:

$$\Psi(k_0 l) = \Psi(\Sigma) = \begin{cases} \pm 1, \text{ при } \Sigma > \Sigma_{\text{опт}} + \sigma_{\Sigma} \text{ или } \Sigma < \Sigma_{\text{опт}} - \sigma_{\Sigma} \\ 0, \text{ при } |\Sigma| \leq \Sigma_{\text{опт}} + \sigma_{\Sigma}, \end{cases} \quad (5)$$

где $k_0 = \Sigma[n]/l[n]$ – передаточный коэффициент объекта регулирования; $\Sigma_{\text{опт}}$ – оптимальное для режима обработки значение информационной координаты $\Sigma[n]$, соответствующее значению $l_{\text{опт}}$, σ_{Σ} – среднеквадратичное отклонение $\Sigma[n]$.

Анализ задач управления электроимпульсной установкой и путей их решения показывает, что при изменении технологических режимов работы и внешних условий изменяются коэффициенты модели объекта управления и статистические характеристики информационных координат. Возникает необходимость корректировки закона управления или коэффициентов и настроек системы управления в процессе работы. Процедуру адаптации можно обеспечить с помощью нечеткой логики [5], используя в качестве базы знаний и базы правил, полученные экспериментальные данные. Применение аппарата нечеткой логики позволит для отдельных локальных областей пространства состояний объекта управления вводить различные корректирующие

воздействия, учитывая полную информацию и изменение условий. Блок-схема адаптивной системы управления электроимпульсной установкой с использованием нечеткого регулятора (НР) приведена на рис. 5.

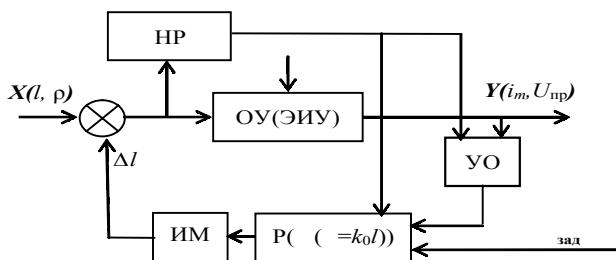


Рисунок 5 – Блок-схема САУ ЭИУ с НР

Входными переменными НР являются координаты вектора состояния объекта управления: $l[n] = \Sigma[n]/k_0$, p . Выходной величиной является вектор сигналов на изменение коэффициентов устройства оценки информационного сигнала (ОУ) и регулятора режима работы (Р). Используя априорную информацию, полученную при экспериментальном исследовании объекта управления, определены интервалы изменения входных переменных НР и установлены 4 терма входной переменной $\Sigma[n] = k_0 l[n]$ (см. рис. 6) и 3 терма p , что соответствует количеству участков аппроксимации экспериментальных зависимостей. Форма термов принята трапециидальной, что сокращает время обработки сигналов. Функция принадлежности НР для $\Sigma[n]$ изображена на рис. 6.

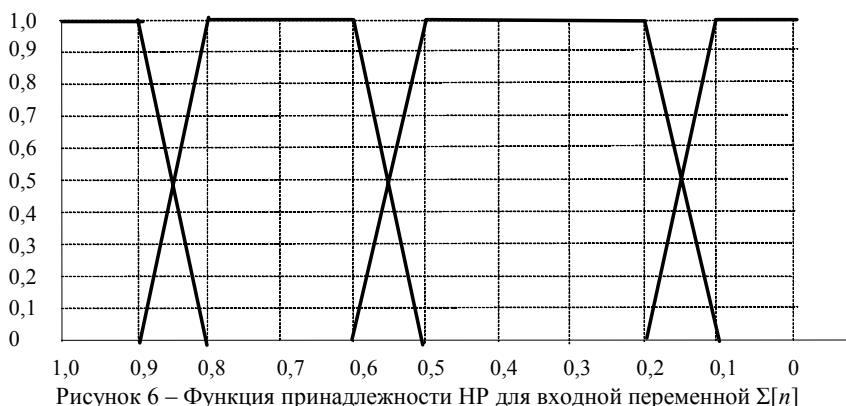


Рисунок 6 – Функция принадлежности НР для входной переменной $\Sigma[n]$

При определении функций принадлежности и создании базы правил НР для корректировки коэффициентов алгоритма обработки информационного сигнала устройством оценки, а также величины зоны нечувствительности и

передаточного коэффициента регулятора в зависимости от положения объекта в пространстве состояний и изменения дисперсии информационного сигнала, используются экспериментально полученные зависимости $k_0(\rho, l)$, $\sigma(\rho, l)$ (см. табл. 2,3 и рис. 1,2,3,4).

Выводы. Результаты исследований ЭИУ показали, что коэффициенты модели управления и статистические характеристики информационных координат зависят от положения объекта в пространстве состояний и требуют корректировки в процессе управления, то есть адаптации. Предложенный метод корректировки коэффициентов системы управления с помощью нечеткой логики позволяет поддерживать оптимальные режимы ЭИУ при изменяющихся технологических параметрах и внешних условиях. База правил НР легко может быть расширена за счет экспериментальных данных, обеспечивая адаптивность управления при различных режимах обработки, что повышает точность и расширяет зону управляемости объекта.

Список литературы: 1. Управление электрогидроимпульсными процессами / И.Т.Вовк, В.Б.Друмирецкий, Е.В.Кривицкий, Л.Е.Овчинникова. – Киев: Наукова думка, 1984. – 186 с. 2. Володарский Е.Т., Малиновский Б.Н., Туз Ю.М. Планирование и организация измерительного эксперимента. – Киев: Вища школа, 1987. – 280 с. 3. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: Наука, 1981. – С. 78. 4. Вовченко А.И., Козырев С.С., Назарова Н.С. Корреляционный анализ процессов предпробойной стадии электроимпульсного преобразования энергии // Техн. Электродинамика. – 2005. – № 4. – С. 3-7. 5. Гостев В.И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления. – Киев: «Радиоаматор», 2003. – 512 с.

Поступила в редколлегию 06.10.2006

УДК 621.373.5

М.И.БАРАНОВ, докт.техн.наук, НТУ «ХПИ»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ДВУХ СХЕМ ПОСТРОЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПОДЖИГАЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

На основі багаторічного досвіду експлуатації потужних електрофізичних установок виконано порівняльний аналіз роботи двох схем електричного запуску імпульсами високої напруги генераторів імпульсних напруг (струмів) та дано рекомендації що до їх практичного застосування.

Based on longstanding experience of exploitation of powerful electro physical set-ups, a comparison study of operation of two schemes of electrical triggering by high voltage pulses of voltage (current) pulsed generators is performed, and recommendations of their practical implementation are given.